

06

Исследование экранирующих свойств композитов на основе силиконовой смолы и оксида висмута к гамма-излучению

© Н.И. Черкашина, В.И. Павленко, А.Ю. Ручий, Р.В. Сидельников, Д.Д. Мачукаев, Н.И. Бондаренко

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,
308012 Белгород, Россия
e-mail: artiem.ruchii.99@mail.ru

Поступило в Редакцию 30 сентября 2025 г.

В окончательной редакции 4 декабря 2025 г.

Принято к публикации 5 февраля 2026 г.

Представлено исследование радиационно-защитных композитов на основе силиконовой смолы с добавками оксида висмута в концентрациях 0 wt.%, 20 wt.%, 40 wt.% и 60 wt.%. Научный интерес работы заключается в определении максимальной концентрации оксида висмута в силиконовой матрице, при которой сохраняется баланс между способностью экранировать гамма-излучение и механической прочностью (на растяжение). В отличие от известных исследований с содержанием Bi_2O_3 10 wt.% – 30 wt.% здесь разработана технология синтеза и найден критический предел наполнения. Выполнен синтез материалов с целью повышения их способности экранировать гамма-излучение. Проведен микроскопический анализ поверхностной структуры композитов, а также исследованы физико-механические характеристики. Кроме того, оценена способность разработанных материалов ослаблять гамма-излучение. Результаты показали значительное улучшение экранирующей способности материала при концентрации оксида висмута 40 wt.%. Полученные результаты позволили оценить потенциал силиконовых композитов с оксидом висмута в качестве эффективных радиационно-защитных материалов.

Ключевые слова: силиконовая смола, оксид висмута, композит, гамма-излучение.

DOI: 10.61011/JTF.2026.07.63128.277-25

Введение

Современные радиационно-защитные материалы играют ключевую роль в обеспечении безопасности при работе с источниками ионизирующего излучения [1–4]. В связи с этим продолжается поиск новых композитов, обладающих высокой радиационной стойкостью, механической прочностью и технологической доступностью [5–8]. Традиционные металлические экраны с высоким Z (свинец, вольфрам, сталь) эффективны для защиты от гамма- и рентгеновского излучения, бетоны же эффективны в защите от гамма-излучения, а тяжелые бетоны с добавкой бора эффективны для экранирования нейтронного излучения. Однако массогабаритные характеристики данных материалов уступают полимерным композитам. Полимерные материалы с добавкой тяжелых металлов или их оксидов эффективно поглощают как гамма-, так и нейтронное излучение (из-за синергетического эффекта атомов водорода и металлов с высоким Z). Полимерные композиты, наполненные атомами тяжелых металлов, как правило, легче своих металлических и бетонных аналогов при сопоставимой степени защиты. Их можно отливать в сложные геометрические формы, создавая детали сложной конфигурации. Композиты на основе полимеров могут быть гибкими и эластичными. Конструкционные полимеры инертны и устойчивы ко многим агрессивным средам, большинство из которых являются диэлектриками, что важно для защиты электроники [9]. Силиконовые смолы представ-

ляют собой многообещающую матрицу для разработки инновационных радиационно-защитных композитных материалов благодаря их выдающимся физико-химическим свойствам [10]. Силиконовая смола обладает рядом преимуществ по сравнению с другими полимерными матрицами: высокая энергия связи основной цепи $\text{O}-\text{Si}$ ($\sim 452 \text{ kJ/mol}$) по сравнению с энергией связи $\text{C}-\text{C}$ ($\sim 348 \text{ kJ/mol}$) в большинстве полимеров, что делает силикон более устойчивым к разрыву цепи под действием ионизирующего излучения; термостабильность в широком температурном диапазоне ($-60^\circ\text{C} - 250^\circ\text{C}$), что критически важно, так как ионизирующее воздействие сопровождается тепловыделением; высокая гибкость и эластичность, что позволяет поглощать механические напряжения, в том числе вибрации, ударные нагрузки, термическое расширение/сжатие; силиконовые смолы обладают высокими диэлектрическими свойствами (удельное объемное электрическое сопротивление составляет $10^{14} \Omega \cdot \text{m}$, а электрическая прочность — $25-40 \text{ kW/mm}$ для вулканизированного каучука) [11]. Среди этих характеристик также следует отметить хорошую совместимость с тяжелыми элементами, такими как висмут [12,13]. Хотя эпоксидные смолы и полиэтилен могут превосходить силиконы по чистой механической прочности или нейтронной защите, их уникальные свойства и способность выдерживать экстремальные условия делают силиконы незаменимыми для критически важных применений в радиационно-защитной сфере.

Висмут, обладая высоким атомным номером ($Z = 83$), демонстрирует высокую эффективность в поглощении гамма-излучения, что делает его ценным компонентом для радиационно-защитных материалов [14–17].

В контексте материаловедения силиконовые смолы выступают в роли многофункциональной основы, обеспечивая не только структурную целостность, но и необходимые эксплуатационные свойства композитов [18,19]. Их химическая инертность в широком диапазоне температур и агрессивных сред гарантирует долговечность и надежность готовых изделий. Эластичность силиконовых смол позволяет создавать материалы с высокой устойчивостью к механическим нагрузкам и деформациям, что особенно важно для конструкций, эксплуатируемых в условиях динамических воздействий [20].

Композиционные материалы на основе силиконовых смол с добавкой оксидов тяжелых металлов демонстрируют превосходные радиационно-защитные характеристики [21,22]. Висмут, благодаря своим уникальным ядерным свойствам, эффективно поглощает гамма-кванты, что значительно снижает уровень радиационного излучения [23,24]. Это делает такие композиты перспективными для использования в ядерной энергетике, медицине и других областях, где требуется защита от ионизирующего излучения [3].

В статье [5] рассматривается вопрос о применении полимерных композитов, содержащих наполнители с высоким атомным номером, для обеспечения радиационной защиты. Авторы статьи подчеркивают, что использование таких материалов позволяет создавать легкие, пластичные и удобные в обработке материалы.

В работе [6] исследователи синтезировали композит на основе полиимида с модифицированными частицами Bi_2O_3 . Проведенный анализ радиационной защиты показал, что массовый коэффициент ослабления гамма-излучения при наполнении 60 wt.% составил $0.24 \text{ cm}^2/\text{g}$ при энергии излучения гамма-квантов 0.662 MeV . Ученые пришли к выводу, что, помимо высоких радиационно-защитных свойств, добавка оксида висмута в полимерную матрицу значительно повышает термостойкость материала.

В работе [25] исследован гибкий силиконовый композит с добавкой шлака из электронных отходов (порошкообразного шлака электронно-лучевой трубки (Cathode Ray Tube — CRT)) и показана его эффективность в экранировании гамма-излучения без снижения физико-механических характеристик, что демонстрирует современные подходы к экологичной разработке защитных материалов. Так, линейный коэффициент ослабления композита, содержащего 50 wt.% CRT, при энергии излучения 0.06 MeV составил 2.025 cm^{-1} , массовый — $1.189 \text{ cm}^2/\text{g}$, однако при энергии излучения 0.662 MeV массовые коэффициенты ослабления всех композитов сопоставимы ($\sim 0.075 \text{ cm}^2/\text{g}$).

В исследовании [1] ученые создали композитные материалы на основе силикона, в состав которых были включены наночастицы оксидов тяжелых металлов. Эти

материалы продемонстрировали повышенную термическую стабильность, улучшенные физико-механические и радиационно-защитные характеристики. Так, при энергии излучения гамма-квантов 0.06 MeV линейный коэффициент ослабления для бездобавочного образца составил 0.310 cm^{-1} , для образца, содержащего по 15 wt.% Bi_2O_3 , WO_3 , BaO , Zr_2O_3 — 9.414 cm^{-1} , а при энергии излучения 0.662 MeV — 0.110 и 0.260 cm^{-1} соответственно.

В статье [18] рассмотрены материалы на основе силиконового каучука с добавкой Bi_2O_3 , CdO и SnO_2 в равных пропорциях в микро- и нанометрическом размере. Результаты исследования показали, что наибольшую прочность при растяжении имеет композит с содержанием 20 wt.% микроразмерной добавки. Массовые коэффициенты ослабления гамма-излучения для композитов с содержанием добавки 0 wt.%, 20 wt.%, 50 wt.% при энергии излучения 0.06 MeV составили 0.219, 1.166, 2.558 cm^{-1} соответственно, а при энергии излучения 0.662 MeV — 0.107, 0.082, 0.084 cm^{-1} соответственно.

Таким образом, силиконовые смолы, благодаря своим физико-химическим свойствам, а также хорошей совместимости с тяжелыми элементами, предоставляют широкие возможности для разработки передовых композитных материалов с требуемыми эксплуатационными параметрами.

В настоящей работе рассматривается синтез и комплексное исследование силиконовых композитов с различным содержанием оксида висмута, включая микроструктурный анализ, физико-механические свойства и стойкость к гамма-излучению, что позволит определить их применимость в радиационной защите.

Научный интерес настоящей работы заключается в исследовании пределов наполнения силиконовой матрицы оксидом висмута (Bi_2O_3) для создания высокоэффективных радиационно-защитных композитов. В отличие от большинства исследований, фокусирующихся на введении малых долей наполнителя (10 wt.% – 30 wt.%), целью настоящей работы является разработка технологичных методик синтеза и определение критической (максимально возможной) концентрации оксида висмута, при которой достигается оптимальный баланс между высокими радиационно-защитными характеристиками и сохранением ключевых физико-механических свойств, в первую очередь, прочности при растяжении.

1. Материалы и методы исследования

1.1. Материалы

В качестве полимерной матрицы для синтеза образцов использовали силиконовую резиновую смесь СП-111, изготовленную на основе синтетического силиконового каучука, производства ООО „НТЦ Резина“, РФ.

В качестве наполнителя использовали чистый (ч.) оксид висмута(III) (Bi_2O_3) производства ООО „АО РЕАХИМ“, РФ. Преобладающая фракция частиц

оксида висмута — $11.4 \mu\text{m}$, удельная поверхность порошка — $34\,780 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$.

1.2. Технология синтеза

Силиконовую смолу подмораживали при -2°C в течение 24 h, затем измельчали вместе с наполнителем (Bi_2O_3) в лабораторной шаровой мельнице ИВМУ-100-2 производства „НТ Machinery“, Япония. Предварительно пресс-форму разогревали в сушильном шкафу КС-136 (производства ООО „Метротест“, РФ) при 150°C в течение 30–40 min, после чего загружали материал. Затем осуществляли предварительное прессование на машине испытательной универсальной РЭМ-100А-1-1 (производства ООО „Метротест“, РФ) в течение 1 min для равномерного распределения материала с нагрузкой не больше 30 МПа. Далее пресс-форму с материалом выдерживали в течение 40–50 min при температуре 150°C . После чего осуществляли основное прессование с нагрузкой 10 МПа. Вулканизацию материала осуществляли при 200°C в течение 24 h. Для проведения испытаний на растяжение композиты изготавливали в виде лопаток (рис. 1).

В ходе исследования было получено четыре вида образцов, которые содержали разное количество оксида висмута: 0 wt.%, 20 wt.%, 40 wt.% и 60 wt.%. Выбор максимальной загрузки в 60 wt.% обусловлен технологическим порогом: дальнейшее увеличение содержания оксида висмута приводит к резкой потере эластичности и механической целостности материала, а также к затруднению его обработки из-за чрезмерного увеличения вязкости композиции. При концентрации выше 60 wt.% образцы становились хрупкими и расслаивались.

1.3. Методы исследования

Для проведения количественного анализа компонентов и образцов применялись лабораторные весы модели ВК-600, изготовленные АО „МАССА-К“, РФ. Эти весы обладают разрешающей способностью в 0.01 g,

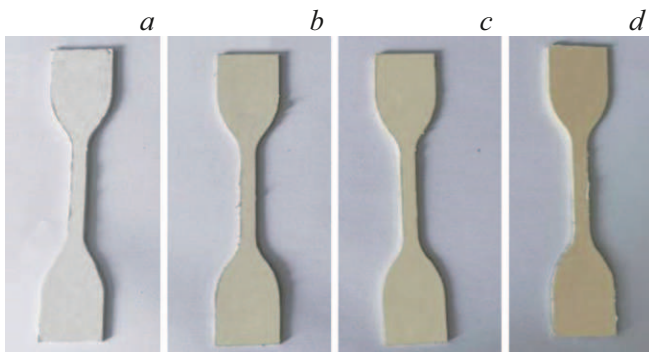


Рис. 1. Изображение полученных композитов на основе силиконовой смолы с добавкой Bi_2O_3 : *a* — 0 wt.%, *b* — 20 wt.%, *c* — 40 wt.%, *d* — 60 wt.%.

что позволяет обеспечивать необходимую точность при выполнении аналитических задач.

Для определения краевого угла смачивания образцов применялось оборудование „Krüss DSA30“ с диапазоном измерения от 0 до 180° и точностью 0.3° производства компании „Krüss“ GmbH, Германия.

Для изучения морфологии полученных образцов был использован метод растровой электронной микроскопии (РЭМ) с применением микроскопа высокого разрешения Tescan Mira 3 LMU. С помощью детектора обратно рассеянных электронов (BSE) были получены изображения поверхности образцов.

Исследование механических характеристик материалов, таких как испытания на растяжение, проводилось с использованием универсальной испытательной машины „РЭМ-100-А-1-1“, изготовленной ООО „Метротест“, РФ.

В ходе исследований на растяжение была использована стандартная методика, соответствующая ГОСТ 11262-2017 (ISO 527-2:2012) [26]. Для проведения испытаний были подготовлены по три образца первого типа каждого состава размером $117 \times 25 \times 2 \text{ mm}$. Расстояние между зажимами составляло 80 mm.

Предел прочности на разрыв (σ_{pm} , [МПа]) вычисляли по следующей формуле:

$$\sigma_{pm} = F_{pm}/A_0, \quad (1)$$

где F_{pm} — максимальная растягивающая нагрузка, [N]; A_0 — поперечное сечение образца до испытаний, [mm^2].

Для определения степени радиационной защиты синтезированных материалов от гамма-излучения использовался дозиметр-радиометр „ДКС-96“ с блоком детектирования „БДКС-96Б“. На рис. 2 показана схема проведения испытаний образцов под воздействием гамма-излучения.

Сначала был измерен фон, значение которого было сохранено в устройстве. Затем в свинцовую емкость были помещены источники гамма-излучения, и был проведен замер эквивалентной дозы без защитного экрана (I_0 , [$\mu\text{Sv/h}$]). После этого в емкость был помещен исследуемый композит толщиной от 0.220 до 0.250 cm, закрепленный в специальном пазе. Таким образом, был создан защитный экран. Затем был проведен замер эквивалентной дозы (I , [$\mu\text{Sv/h}$]). В качестве источников гамма-излучения использовались ^{207}Bi , ^{137}Cs и ^{60}Co с энергиями излучения 0.570, 0.662 и 1.252 MeV соответственно. Эквивалентная доза измерялась трижды для каждого материала.

Все источники гамма-квантов, изготовленные в соответствии с ОСГИ 4 [27,28], имеют форму дисков с диаметром 12.5 mm. Каждый диск покрыт полимерной оболочкой толщиной 3 mm. Внутри оболочки находится активный радионуклид. Данные источники излучения были произведены АО „Радиевый институт им. В.Г. Хлопина“, РФ.

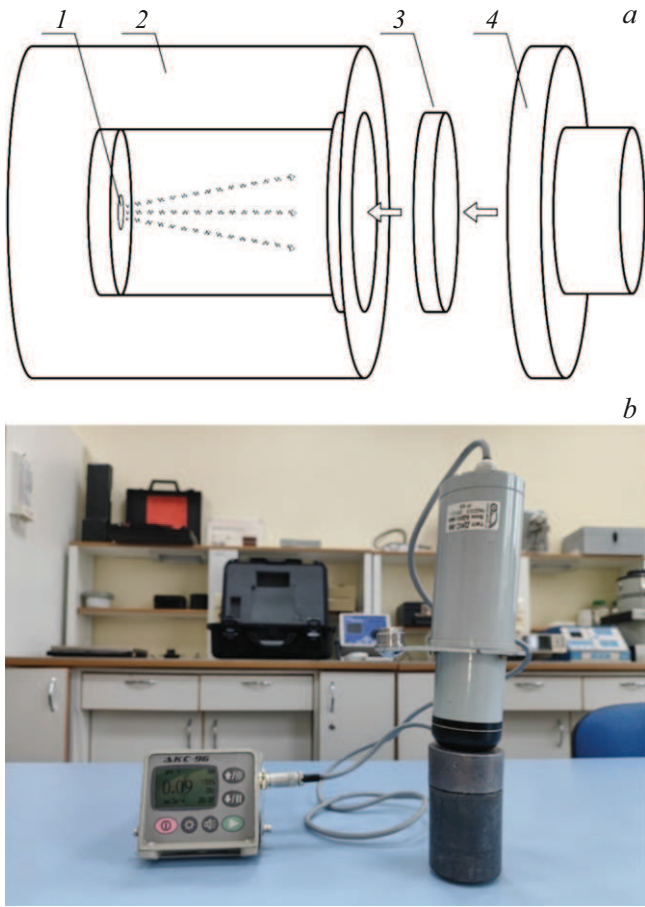


Рис. 2. *a* — схема проведения испытаний композитных материалов на радиационно-защитные характеристики к гамма-излучению: 1 — источник гамма-излучения; 2 — свинцовая емкость; 3 — образец для исследования; 4 — блок детектирования „БДКС-96Б“. Направление распространения излучения обозначено стрелками; *b* — изображение дозиметра-радиометра „ДКС-96“ с блоком детектирования „БДКС-96Б“.

Линейный коэффициент ослабления гамма-излучения (μ , [cm⁻¹]) рассчитывался по формуле

$$\mu = \ln(I_0/I)/d, \quad (1)$$

где I_0 — мощность эквивалентной дозы в отсутствие защиты, [μSv/h]; I — мощность эквивалентной дозы при наличии защиты, [μSv/h]; d — толщина слоя защиты, [cm].

Массовый коэффициент ослабления гамма-излучения (μ_m , [cm²/g]) рассчитывали по формуле

$$\mu_m = \mu/\rho, \quad (2)$$

где ρ — плотность защиты, [g/cm³].

Толщину слоя половинного ослабления гамма-квантов ($d_{1/2}$, [cm]) рассчитывали по формуле

$$d_{1/2} = \ln(2)/\mu, \quad (3)$$

где μ — линейный коэффициент ослабления гамма-излучения, [cm⁻¹].

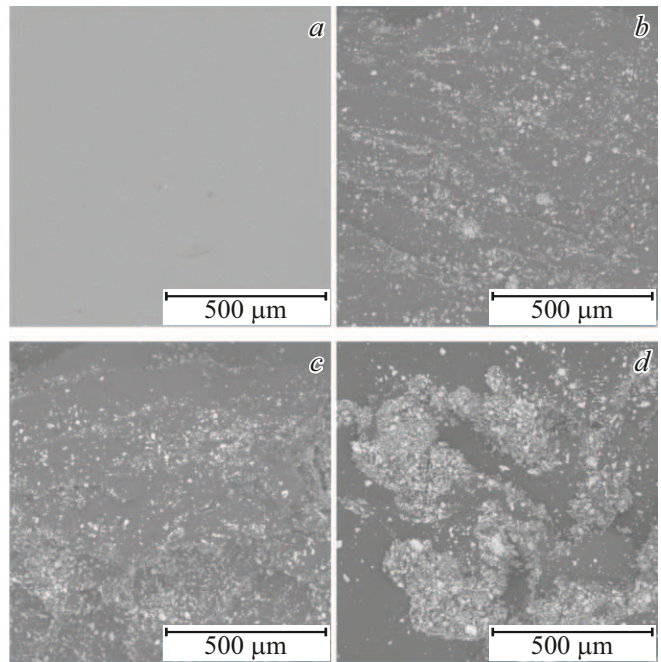


Рис. 3. СЭМ-изображения исследуемых композитов с добавкой: *a* — 0 wt.%, *b* — 20 wt.%, *c* — 40 wt.%, *d* — 60 wt.% Bi₂O₃.

2. Результаты и обсуждение

2.1. Анализ морфологии исследуемых композитов

Для исследования структуры поверхности полученных материалов были сделаны снимки с помощью растривого электронного микроскопа в режиме регистрации электронов, отраженных от поверхности образца (рис. 3). На СЭМ-изображении можно увидеть, что в полимерной матрице есть светлые вкрапления, которые соответствуют оксиду висмута. Важно подчеркнуть, что во всех образцах, кроме образца с добавкой 60 wt.%, оксид висмута равномерно распределен по всей поверхности композита.

2.2. Исследование краевого угла смачивания

Результаты исследования краевого угла смачивания полученных композитов представлены на рис. 4.

На основе исследования краевого угла смачивания композитных материалов можно заключить, что при увеличении количества наполнителя в них происходит смещение баланса между гидрофобными и гидрофильными свойствами в сторону гидрофобности. В частности, при увеличении содержания Bi₂O₃ в композитах от 0 wt.% до 60 wt.% краевой угол смачивания постепенно увеличивается с (93.85 ± 0.45)° до (121.40 ± 0.40)°. Исследование краевого угла смачивания проведено для косвенной оценки совместимости компонентов композита и его устойчивости к влаге. Рост гидрофобности с увеличением доли Bi₂O₃ свидетельствует о хорошей

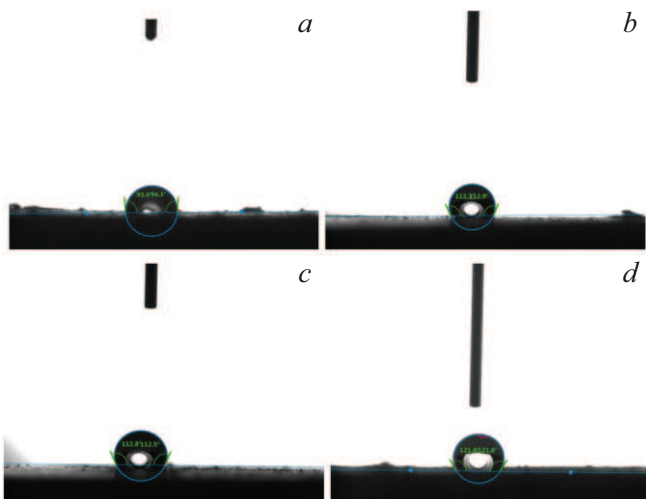


Рис. 4. Изображение капли воды на полученных композитах с добавкой: *a* — 0 wt.%, *b* — 20 wt.%, *c* — 40 wt.%, *d* — 60 wt.% Bi_2O_3 .

степени дисперсии наполнителя в полимерной матрице и низкой вероятности расслоения. Это критически важно для долговечности материала в условиях реальной эксплуатации, где влага может способствовать коррозии и снижению защитных свойств.

2.3. Исследование физико-механических характеристик композитов

Результаты определения прочности при растяжении синтезированных композитов представлены на рис. 5.

В ходе исследования было установлено, что при добавлении 20 wt.% оксида висмута к материалу его прочность на разрыв увеличивается на 0.1 МПа. Если же содержание оксида висмута увеличивается до 40 wt.%, то прочность на разрыв снижается по сравнению с образцом без добавок на 0.9 МПа. Однако при максимальном содержании оксида висмута в количестве 60 wt.% прочность на разрыв составляет 6.1 МПа, что сопоставимо с прочностью образца без добавок, которая равна 6.4 МПа. Причиной повышения прочности на разрыв композита с содержанием 60 wt.% наполнителя, скорее всего, послужило неравномерное распределение оксида висмута в матрице полимера.

Также для полученных композитов был проведен анализ плотности гидростатическим методом, результаты которого представлены в табл. 1.

В рамках проведенного анализа была выявлена следующая закономерность: существует прямая корреляция между содержанием оксида висмута в композиции и ее плотностью. Установлено, что с увеличением процентного содержания оксида висмута наблюдается пропорциональное возрастание плотности композита, что подтверждает важность данного параметра в контексте совершенствования свойств материала. Наши ма-

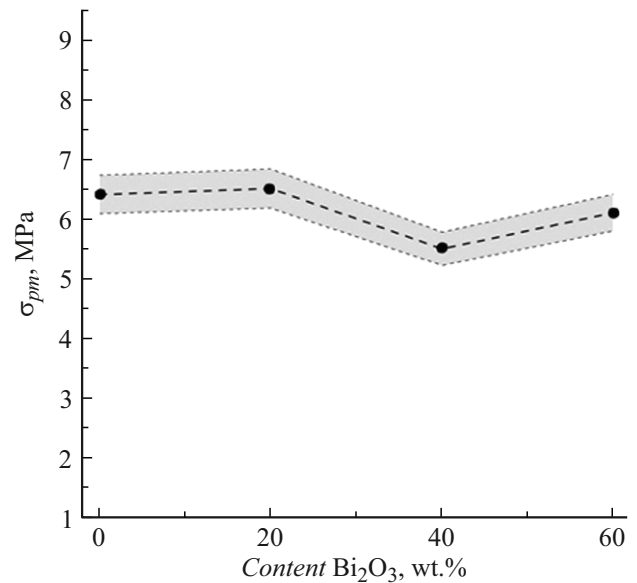


Рис. 5. Предел прочности полученных композитов при растяжении.

териалы могут конкурировать с другими полимерными радиационно-защитными материалами, значение плотности которых превышает 4 g/cm^3 , так как массогабаритные характеристики весьма важный параметр при выборе необходимой защиты.

2.4. Исследование радиационно-защитных характеристик композитов к гамма-излучению

В ходе экспериментального облучения созданных композитных материалов были получены данные (табл. 2), которые легли в основу вычислений линейного коэффициента ослабления (μ , $[\text{cm}^{-1}]$), массового коэффициента ослабления (μ_m , $[\text{cm}^2/\text{g}]$) и толщины слоя половинного ослабления гамма-квантов ($d_{1/2}$, $[\text{cm}]$). Были проведены аналогичные опыты и вычисления для образца, изготовленного из бездобавочной силиконовой смолы. Итоги вычислений представлены в табл. 3.

В соответствии с данными табл. 3, можно сделать следующие выводы: чем больше энергия гамма-излучения, тем меньше линейный и массовый коэффициенты ослабления композитов. Это согласуется с увеличением слоя половинного ослабления. Важно подчеркнуть, что увеличение количества оксида висмута в материале от 0 wt.% до 60 wt.% приводит к увеличению линейного коэффициента ослабления и уменьшению слоя половинного ослабления. Показания массового коэффициента ослабления для композитов, содержащих 40 wt.% и 60 wt.% наполнителя, сопоставимы.

В ходе исследования было выявлено, что лучшим композитом для защиты от гамма-излучения является материал, содержащий 40 wt.% Bi_2O_3 ввиду высоких

Таблица 1. Плотность полученных композитов

Параметр	Содержание Bi_2O_3 в композите, wt.%			
	0	20	40	60
Плотность, g/cm^3	1.20 ± 0.036	1.47 ± 0.049	1.71 ± 0.060	2.43 ± 0.090

Таблица 2. Результаты измерений радиационно-защитных характеристик разработанных образцов

Содержание наполнителя, wt.%	Толщина образца, см	Параметр	Энергия, MeV		
			0.570 (^{207}Bi)	0.662 (^{137}Cs)	1.252 (^{60}Co)
			Эквивалентная доза излучения, $\mu\text{Sv/h}$		
Без образца	–	I_0	3.230 ± 0.161	3.751 ± 0.222	5.570 ± 0.390
0	0.220 ± 0.003	I	2.813 ± 0.141	3.581 ± 0.183	5.460 ± 0.382
20	0.225 ± 0.003	I	2.517 ± 0.126	3.525 ± 0.194	5.444 ± 0.352
40	0.225 ± 0.003	I	2.496 ± 0.125	3.467 ± 0.166	5.317 ± 0.423
60	0.250 ± 0.003	I	2.154 ± 0.118	3.323 ± 0.159	5.177 ± 0.393

Таблица 3. Радиационно-защитные показатели разработанных композитов

Параметр	Энергия, MeV	Содержание Bi_2O_3 в материале, wt.%			
		0	20	40	60
Линейный коэффициент ослабления, cm^{-1}	0.570 (^{207}Bi)	0.628 ± 0.050	1.109 ± 0.089	1.146 ± 0.092	1.621 ± 0.130
	0.662 (^{137}Cs)	0.211 ± 0.017	0.276 ± 0.022	0.350 ± 0.028	0.485 ± 0.038
	1.252 (^{60}Co)	0.091 ± 0.007	0.102 ± 0.008	0.207 ± 0.017	0.293 ± 0.024
Массовый коэффициент ослабления, cm^2/g	0.570 (^{207}Bi)	0.524 ± 0.042	0.754 ± 0.061	0.670 ± 0.054	0.667 ± 0.053
	0.662 (^{137}Cs)	0.176 ± 0.014	0.188 ± 0.015	0.205 ± 0.016	0.199 ± 0.014
	1.252 (^{60}Co)	0.076 ± 0.006	0.069 ± 0.006	0.121 ± 0.010	0.120 ± 0.010
Толщина слоя половинного ослабления, см	0.570 (^{207}Bi)	1.103 ± 0.088	0.625 ± 0.050	0.605 ± 0.048	0.428 ± 0.035
	0.662 (^{137}Cs)	3.288 ± 0.263	2.510 ± 0.199	1.981 ± 0.158	1.430 ± 0.115
	1.252 (^{60}Co)	7.645 ± 0.609	6.816 ± 0.544	3.355 ± 0.268	2.368 ± 0.189

показателей массового коэффициента ослабления и сопоставимой прочностью на разрыв с бездобавочным материалом. Дальнейшее увеличение содержания наполнителя в полимерной матрице приводит к высокой агрегации частиц, что сказывается на равномерности распределения оксида висмута в композите. Для того чтобы ослабить гамма-излучение с энергией 1.252 MeV в два раза, необходим защитный экран из чистой силиконовой смолы толщиной 7.645 см. Однако если использовать композит, содержащий 40 wt.% наполнителя, то толщина защитного экрана будет всего 3.355 см, что в 2.28 раза меньше. Стоит отметить, что использование композитов с добавкой 60 wt.% оксида висмута целесообразно использовать в тех случаях, когда очень

важна толщина защитного экрана. Так, в сравнении с композитом, содержащим 40 wt.% наполнителя, для экранирования гамма-излучения с энергией 0.662 MeV в два раза, толщина защитного экрана составит 1.981 против 1.430 см. Таким образом, лучшим радиационно-защитным материалом является композит с добавкой 40 wt.% наполнителя. Скорее всего, это связано с неравномерным распределением наполнителя в композите с содержанием 60 wt.% оксида висмута. Для решения этой проблемы в дальнейших исследованиях планируется применить отдельный помол сырьевых компонентов в мельнице криогенного помола.

Для демонстрации преимуществ разработанного радиационно-защитного композита был осуществлен

Таблица 4. Сравнительный анализ радиационно-защитных характеристик

Состав композита	Энергия, MeV					
	0.570 (²⁰⁷ Bi)		0.662 (¹³⁷ Cs)		1.252 (⁶⁰ Co)	
	μ , cm ⁻¹	μ_m , cm ² /g	μ , cm ⁻¹	μ_m , cm ² /g	μ , cm ⁻¹	μ_m , cm ² /g
Силиконовая смола/40 wt.% Bi ₂ O ₃ (разработанный)	1.146±0.092	0.670±0.054	0.350±0.028	0.205±0.016	0.207±0.017	0.121±0.010
Силиконовая смола/50 wt.% CRT [25]	0.551	0.248	0.136	0.075	0.125	0.063
Силиконовая смола/15 wt.% Bi ₂ O ₃ /15 wt.% WO ₃ /15 wt.% BaO/15 wt.% Zr ₂ O ₃ [1]	1.070	0.410	0.260	0.100	0.152	0.058
Силиконовая смола/50 wt.% micro-(Bi ₂ O ₃ , CdO, SnO ₂) [18]	0.173	0.101	0.148	0.084	0.110	0.060

сравнительный анализ с современными полимерными композитами, предназначенными для защиты от радиации. Исследование проводилось по двум ключевым параметрам: линейному и массовому коэффициенту ослабления гамма-излучения. Результаты анализа представлены в табл. 4.

Подводя итог, можно утверждать, что разработанный полимерный композит демонстрирует превосходные радиационно-защитные свойства по сравнению с современными материалами.

Заключение

Результатом проделанной работы является установление возможности синтеза радиационно-защитных материалов на основе силиконовой смолы и оксида висмута. Введение оксида висмута в силиконовую матрицу существенно улучшает радиационно-защитные свойства композитов, при этом сохраняя их механическую прочность. Экспериментально определено, что прочности на растяжение композитов с добавкой 20 wt.%, 40 wt.% и 60 wt.% Bi₂O₃ сравнимы с бездобавочным образцом и составляют 6.5, 5.5 и 6.1 МПа соответственно. Также определено изменение гидрофобно-гидрофильного баланса поверхности композитов в сторону гидрофобности (краевой угол смачивания поверхности композита с добавкой 60 wt.% оксида висмута больше на 27.55° в сравнении с бездобавочным образцом). Микроскопический анализ выявил однородное распределение добавки по поверхности композитов при 20 wt.% и 40 wt.% наполнении, что позитивно сказывается на целостности материала. Композиты продемонстрировали хорошие экранирующие свойства к воздействию гамма-излучения, что подтверждает их перспективность для применения в радиационной защите. Полученные результаты подтверждают важность совершенствования состава и структуры композиционных материалов для достижения желаемых характеристик ослабления гамма-излучения. Дальнейшие исследования могут быть направлены на

доработку состава и масштабирование синтеза для промышленного применения.

Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 24-79-10033 (<https://rscf.ru/project/24-79-10033/>), с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] M.T. Alresheedi, M. Elsafi, Y.T. Aladadi, A.F. Abas, A.B. Ganam, M.I. Sayyed, M.A. Mahdi. *Polymers*, **15** (9), 2160 (2023). DOI: 10.3390/polym15092160
- [2] L. Gilys, E. Griškonis, P. Griškevičius, D. Adlienė. *Polymers*, **14** (9), 1696 (2022). DOI: 10.3390/polym14091696
- [3] E. Hannachi, M.I. Sayyed, Y. Slimani, M.A. Almessiere, A. Baykal, M. Elsafi. *J. Alloys Compounds*, **899**, 163173 (2022). DOI: 10.1016/j.jallcom.2021.163173
- [4] М.С. Шейченко, Н.И. Алфимова, Я.Ю. Вишневская. *Вестник Белгородского гос. тех. ун-та им. В.Г. Шухова*, **5**, 15 (2017). DOI: 10.12737/article_590878fa94e168.59204031
- [5] Q. Chang, S. Guo, X. Zhang. *Mater. Design*, **233**, 112253 (2023). DOI: 10.1016/j.matdes.2023.112253
- [6] V.I. Pavlenko, N.I. Cherkashina, R.N. Yastrebinsky. *Heliyon*, **5** (5), e01703 (2019). DOI: 10.1016/j.heliyon.2019.e01703
- [7] Z. Özkan, U. Gökmen. *Rad. Phys. Chem.*, **213**, 111250 (2023). DOI: 10.1016/j.radphyschem.2023.111250
- [8] В.Н. Гульбин, Н.С. Колпаков, В.В. Поливкин. *Известия Волгоградского гос. тех. ун-та*, **23** (150), 43 (2014).
- [9] Д.Г. Тарасов, В.И. Павленко. *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*, **1** (6), 125 (2010).
- [10] R. Malekzadeh, V.S. Zali, O. Jahanbakhsh, M. Okutan, A. Mesbahi. *Nanomedicine J.*, **7** (4), 324 (2020). DOI: 10.22038/nmj.2020.07.00009

- [11] Е.А. Коленко. *Технология лабораторного эксперимента: измерения, конструкционные материалы и их обработка, теххимия и экспрессное материаловедение, микротехнология: справочник* (Политехника, СПб., 1994)
- [12] X. Liu, Q.-P. Zhang, J.-L. Li, R.-C. Chen, W.-D. Xu, Y.-T. Li, W.-B. Yang, Y.-L. Zhou. *J. Appl. Polym. Sci.*, **139** (15), e51914 (2022). DOI: 10.1002/app.51914
- [13] C.V. More, Z. Alsayed, M.S. Badawi, A.A. Thabet, P.P. Pawar. *Environ Chem. Lett.*, **19**, 2057 (2021). DOI: 10.1007/s10311-021-01189-9
- [14] S.S. Kuttakaran, M.R. Ambika, C. Malathi, N. Nagaiah. *Mater. Today: Proceed.*, **89**, 75 (2023). DOI: 10.1016/j.matpr.82023.05.398
- [15] W.M. Al-Saleh, M. Elsafi, H.M. Almutairi, I.M. Nabil, M.A. El-Nahal. *Sci. Rep.*, **14**, 10014 (2024). DOI: 10.1038/s41598-024-60188-2
- [16] А.П. Пичугин, В.Ф. Хриганков, А.В. Пчельников, Д.В. Ромашев. *Известия вуз. Строительство*, **12** (756), 24 (2021). DOI: 10.32683/0536-1052-2021-756-12-24-33
- [17] Z.A. Alrowaili, E.O. Echeweozo, M. Kırkbınar, F. Çalışkan, J.S. Alzahrani, M.S. Al-Buriahi. *J. Radiation Res. Appl. Sci.*, **17** (4), 101162 (2024). DOI: 10.1016/j.jrras.2024.101162
- [18] A.M. El-Khatib, K. Zard, M.I. Abbas, M.M. Gouda. *Sci. Rep.*, **14**, 1578 (2024). DOI: 10.1038/s41598-024-51965-0
- [19] N. Nagaraja, H.C. Manjunatha, L. Seenappa, K.N. Sridhar, H.B. Ramalingam. *Rad. Phys. Chem.*, **171**, 108723 (2020). DOI: 10.1016/j.radphyschem.2020.108723
- [20] A. Saeed, W.A. Abu-raia. *J. Polym. Res.*, **29**, 208 (2022). DOI: 10.1007/s10965-022-03055-w
- [21] B. Ahmed, G.B. Shah, A.H. Malik, Aurangzeb, M. Rizwan. *Appl. Radiat. Isotopes*, **155**, 108901 (2020). DOI: 10.1016/j.apradiso.2019.108901
- [22] V.S. Zali, O. Jahanbakhsh, I. Ahadzadeh. *Radiation Phys. Chem.*, **197**, 110150 (2024). DOI: 10.1016/j.radphyschem.2022.110150
- [23] M. Shabib, E.K. Tawfik, A.M. Abdel Reheem, Afaf Nada, H.A. Ashry. *Appl. Radiat. Isotopes*, **225**, 112010 (2025). DOI: 10.1016/j.apradiso.2025.112010
- [24] S. Prabhu, S.G. Bubbly, S.B. Gudennavar. *J. Appl. Polymer Sci.*, **138** (19), e50369 (2020). DOI: 10.1002/app.50369
- [25] D.A. Elsayed, M. Elsafi, E.H. Abdel-Gawad, S.M. Al-Balawi, M.I. Sayyed, I.H. Saleh. *Sci. Rep.*, **15**, 26458 (2025). DOI: 10.1038/s41598-025-10920-3
- [26] *Пластмассы. Метод испытания на растяжение: ГОСТ 11262-2017 (ISO 527-2:2012) (Дата введения 01.10.2018)*
- [27] В.И. Павленко, Р.В. Сидельников, В.В. Кашибадзе, Д.С. Романюк, А.Ю. Ручий, С.Н. Домарев. *ЖТФ*, **94** (5), 762 (2024). DOI: 10.61011/JTF.2024.05.57815.30-24
- [28] АО „РИТВЕРЦ“, РФ. <https://ritverc.com/ru> (Дата обращения: 15.07.2025)